

УДК 551.21:550.34.

© 1991 г.

Н.А. ЖАРИНОВ, В.И. ГОРЕЛЬЧИК, Е.Ю. ЖДАНОВА,  
В.Н. АНДРЕЕВ, А.Б. БЕЛОУСОВ, М.Г. БЕЛОУСОВА,  
В.А. ГАВРИЛОВ, В.Т. ГАРБУЗОВА, Ю.В. ДЕМЯНЧУК,  
В.П. ХАНЗУТИН

## ИЗВЕРЖЕНИЯ СЕВЕРНОЙ ГРУППЫ ВУЛКАНОВ КАМЧАТКИ В 1988–1989 гг., СЕЙСМОЛОГИЧЕСКИЕ И ГЕОДЕЗИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ

В статье изложены результаты наблюдений за состоянием, сейсмическим режимом и деформациями вулканов Северной группы: Ключевского, Безымянного и Шивелуча, проявлявших активность в 1988–1989 гг. В течение исследуемого периода на Ключевском вулкане на фоне продолжающегося эксплозивно-эффузивного извержения вершинного кратера наблюдалось интенсивное растрескивание вулканической постройки в секторе, заключенном между северо-восточным и южным направлениями, на абсолютных отметках от 2000 м до вершины вулкана. За период 1988–1989 гг. произошло два длительных побочных извержения на отметках, близких к 4000 м, с объемом  $0,03 \text{ км}^3$  каждый. В целом расход извергнутых продуктов за прошедшие два года равен  $0,9 \text{ м}^3/\text{сек}$ , т.е. был близок к среднему расходу за миллионы лет —  $1,0 \text{ м}^3/\text{сек}$ .

На вулкане Безымянный в марте 1988 г. закончилось эффузивное извержение, длившееся с января 1987 г. 2–3 августа 1989 г. произошло еще одно эксплозивно-эффузивное извержение. По характеру они оба существенно не отличаются от извержений последних лет.

На вулкане Шивелуч увеличилось количество эксплозивных извержений (взрывов) и наметилась тенденция к образованию кратерной воронки, охватывающей центральную и западную части активного купола.

ERUPTION OF THE NORTHERN GROUP VOLCANOES IN 1988–1989: SEISMOLOGICAL AND GEODETICAL DATA, by Zh arinov N. A., Gorelchik V. I., Zhdanova E. Yu., Andreev V. N., Beloussov A. B., Beloussova M. G., Gavrilov V. A., Garbuzova V. T., Demianchuk Yu. V. and Khanzutin V. P. The results of observations on seismic regime and deformations of the Northern group volcanoes — Klyuchevskoy, Bezymianny and Sheveluch in 1988–1989 are reported. At Klyuchevskoy on the background of ensuing explosive-effusive eruption of the summit crater intensive fissuring of the volcanic edifice was observed in the sector confined within NE and S slopes at the elevation of 2000 m to the top of the volcano. Two flank eruptions at the elevation close to 4000 m resulted in issuing of  $0,03 \text{ км}^3$  of lava each.

At the Bezymianny volcano an effusive eruption terminated in March 1988 that lasted from January 1987. One more explosive-effusive eruption took place on 2–3 August 1989. In their character both eruptions were much similar to the eruptions of the last years.

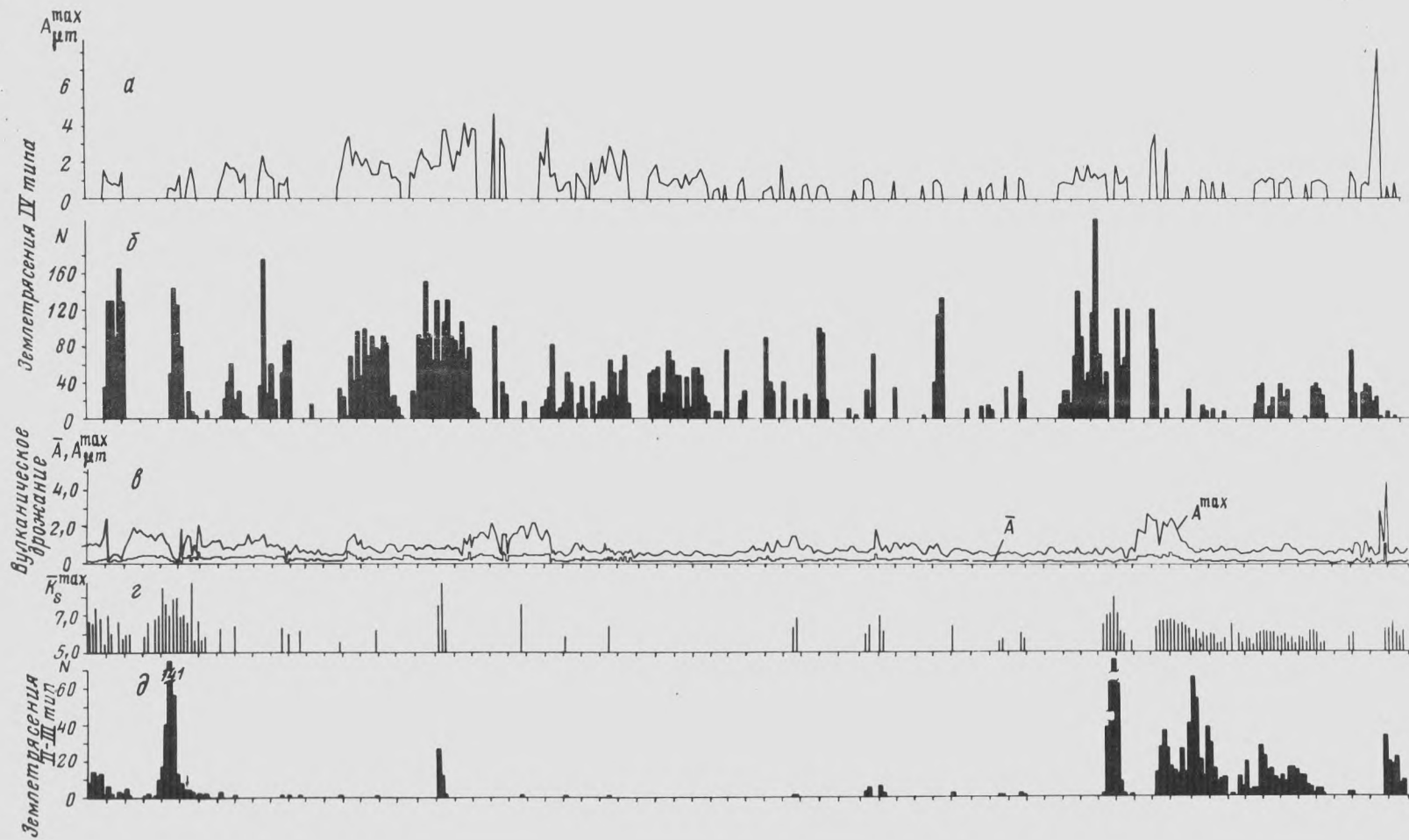
At the Sheveluch volcano the number of explosive eruptions (blasts) increased and a tendency to formation of a crater funnel enveloping the central and western parts of active dome is observed.

(Received February 13, 1991)

*Institute of Volcanology, Far East Division, USSR Academy of Sciences, Petropavlovsk-Kamchatsky, 683006, USSR*

### Вулкан Ключевской

К л ю ч е в с к о й вулкан занимает первое место среди действующих вулканов Северной группы по объему извергнутых продуктов. Начиная с апреля 1984 г. эруптивная деятельность его характеризуется вершинными и побочными извержениями различной продолжительности. В ходе вершинных извержений в



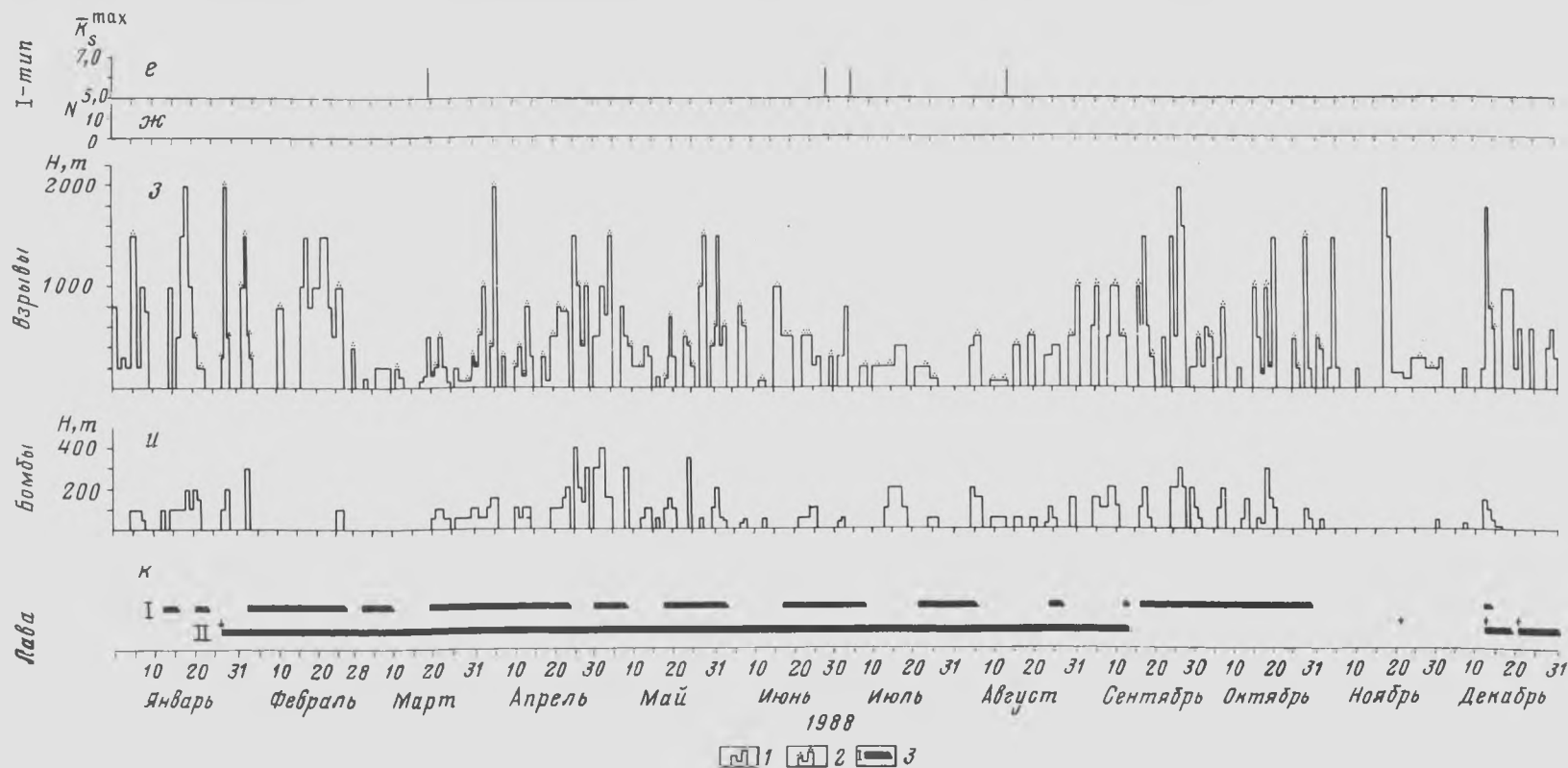
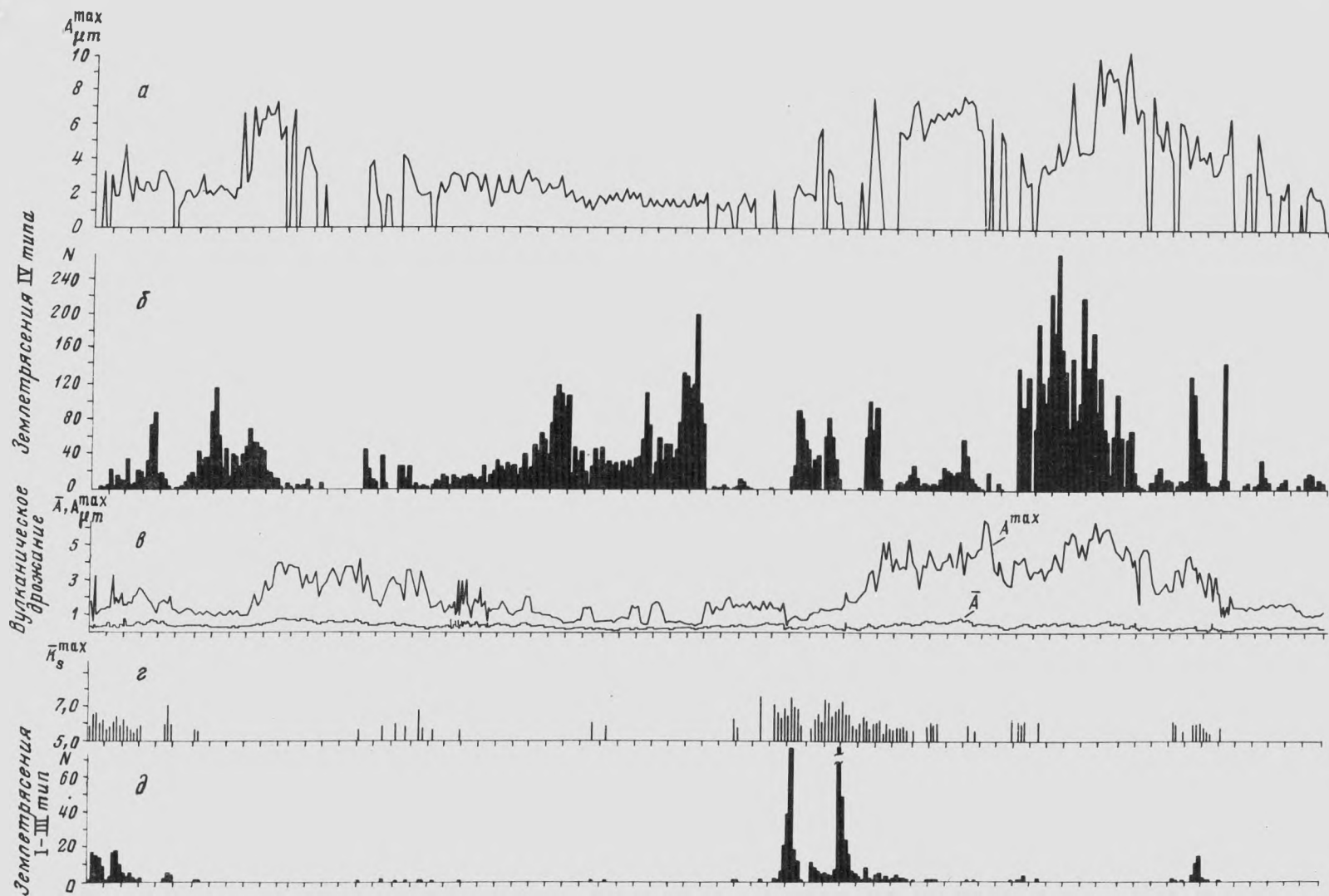


Рис. 1. Суточные характеристики извержений Ключевского вулкана в 1988 г.: а — максимальные амплитуды; б — число вулканических землетрясений IV типа по данным с/ст APH; в — максимальные ( $A^{\max}$ ) и средние ( $\bar{A}$ ) амплитуды вулканического дрожания по данным с/ст APH; г — максимальный энергетический класс  $K_s^{\max}$  вулканических землетрясений II—III типов по данным сети станций; д — число землетрясений II—III типов по данным с/ст APH, PDK, KRS; е — максимальный энергетический класс  $K_s^{\max}$  землетрясения

I типа по данным сети станций; ж — число  $N$  землетрясений I типа по данным с/ст APH, PDK, KRS; з — график изменения высоты подъема парогазовых и пепловых выбросов; и — график изменения высоты выброса вулканических бомб из вершинного кратера и из трещин на склонах вулкана, стрелками показаны моменты образования новых трещин. 1 — высота парогазовых выбросов; 2 — высота пепловых выбросов; 3 — периоды излияния лавы из вершинного кратера (I) и из боковых трещин (II)



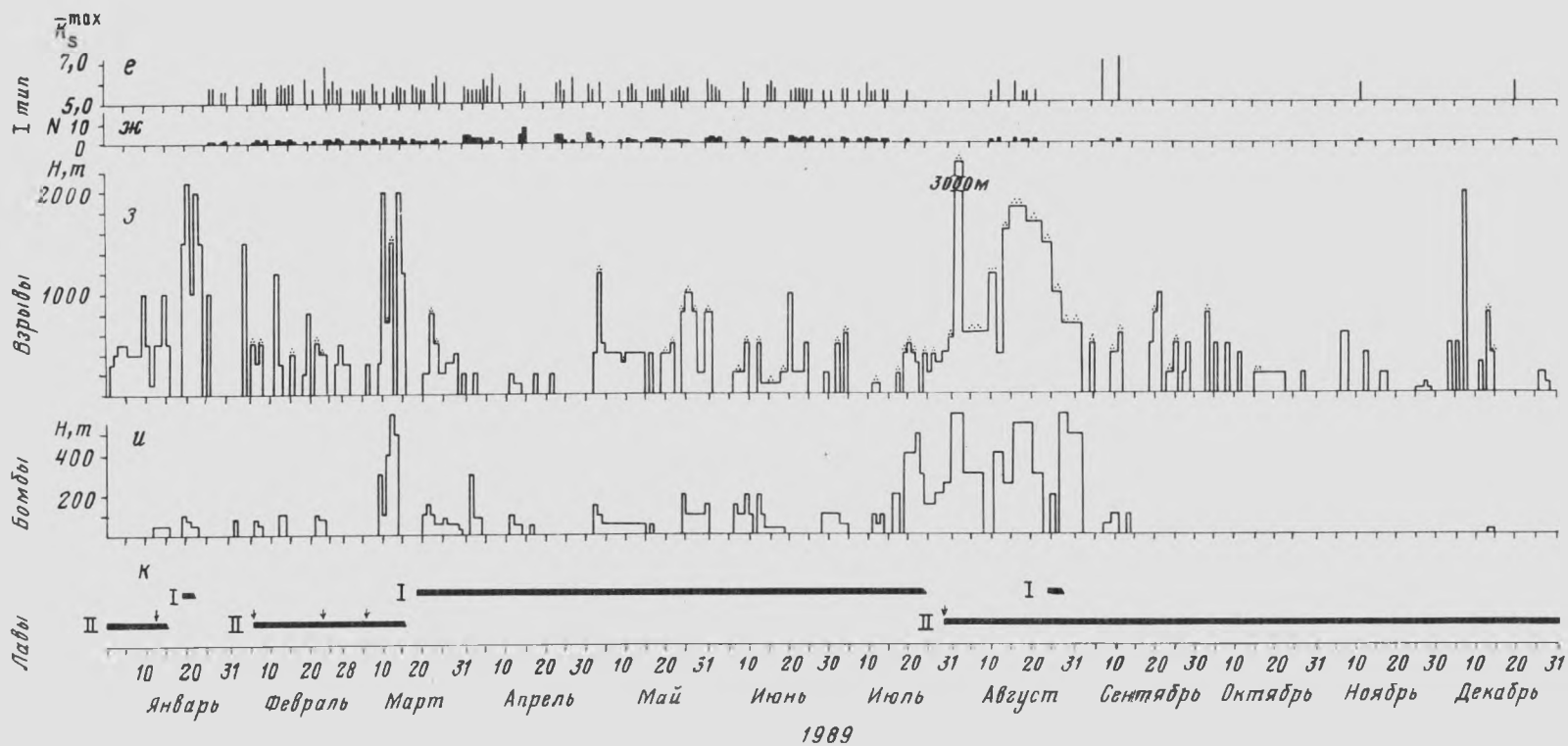


Рис. 2. Суточные характеристики извержений Ключевского вулкана в 1989 г.: а—в — см. на рис. 1, но по данным с/ст PDK; д — см. на рис. 1, но по данным с/ст ZLN, PDK, KRS. Остальные условные обозначения см. на рис. 1

центрального кратере образовалось несколько шлаковых конусов, излились многочисленные лавовые потоки на северный, северо-западный, западный и юго-восточный склоны. Во время побочных прорывов 1987—1989 гг. вблизи эруптивных центров образовались системы трещин. Отличительная особенность событий 1988—1989 гг. — сочетание длительного, почти непрерывного эксплозивно-эффузивного вершинного извержения и побочных прорывов на склонах вулкана. Основные характеристики деятельности Ключевского вулкана в 1988—1989 гг. представлены на рис. 1 и 2 и в Приложении.

Возобновление активности вулкана началось 1 декабря 1987 г. слабым выбросом бомб на высоту 100—200 м. С 14 декабря по северо-западному желобу пошла лава. В 1988 г. лава стекала из вершинного кратера почти постоянно по одному из желобов или по двум, трем сразу. Перерывы в излиянии лавы составляли от 2—3 до 10—20 дней. Наиболее интенсивная эффузивная деятельность вершинного кратера в 1988 г. наблюдалась в октябре, когда лавовые потоки двигались одновременно по трем направлениям: западному, северо-западному и северному склонам. К началу ноября поступление лавы из вершинного кратера прекратилось, и лишь 13—14 декабря в северо-западном (Крестовском) желобе отмечались следы слабой эффузивной деятельности (см. рис. 1).

Эксплозивная деятельность вершинного кратера вулканско-стромболианского и вулканского типов почти не прекращалась в течение всего года. Увеличение частоты и интенсивности эксплозий наблюдалось в январе-феврале на фоне слабой, а в апреле-мае и сентябре-октябре на фоне усилившейся эффузивной деятельности (см. рис. 1 и Приложение).

1988 г. 28 января, спустя одиннадцать месяцев после кратковременного побочного извержения на юго-юго-восточном склоне в феврале-марте 1987 г., на этом же склоне на субрадиальной трещине на высоте 4000 м возник новый эруптивный центр. Побочное извержение, названное прорывом им. XXV-летия Института вулканологии (ИВ), продолжалось 230 сут. — до 14.IX 1988 г. и носило преимущественно эффузивный характер. Трещина, на которой возник прорыв, от эруптивного центра на высоте 4000 м протягивалась кулисообразно вверх до кромки старого кратера Ключевского вулкана. На этой трещине в начальный период извержения образовались серии фумарольных выходов, а 26 февраля на высоте 4300 м была обнаружена газовая бокка, из которой шли паргазовые выбросы на высоту до 300 м (см. Приложение). Начальный период побочного извержения характеризовался спонтанным истечением жидких лавовых потоков со средней скоростью 1—3 м/с, редкими усилениями эксплозивной активности (фонтанирование лавы на высоту до 30—40 м), формированием лавового поля и небольшого, до 40 м высотой пьедестала в виде бесформенного, лавошлакоглыбового, с многочисленными бокками конуса. В июле эффузивный центр побочного извержения сместился вверх по трещине на 100—150 м, где в системе оперяющих трещин возник конус, аналогичный предыдущему, из которого также изливались жидкие базальтовые потоки. В дальнейшем на месте этих двух эффузивных центров образовался провал диаметром около 100 м, в котором был виден подводящий канал в виде дайки мощностью 2 м.

В ходе побочного извержения наблюдались периоды, когда на прорыве отмечались только фумарольная деятельность и возгонообразование. Продолжительность таких "пауз" изменялась от нескольких часов до 2—3 сут, частота и продолжительность пауз возросли к концу извержения. Ширина потока лавы на прорыве колебалась от 1—2 до 4—5 м, скорость течения лавы — от 0,5 до 10 м/с, расход лавы — от 1 до 4 м<sup>3</sup>/с, наибольшая высота выбросов в первой половине извержения достигала 100—120 м. По результатам аэросъемки объем извергнутых продуктов побочного прорыва составил 0,0336 км<sup>3</sup>, объем продуктов извержения вершинного кратера был близок к 0,012 км<sup>3</sup> (устное сообщение В.Н. Двигало). В результате длительного излияния лавы в районе юго-юго-

восточного склона Ключевского вулкана, включающего центр побочного извержения, образовалась депрессия, связанная с таянием и проседанием ледово-пирокластического покрова. Грязевые потоки, возникшие в ходе извержения, распространились на расстояние более 20 км от места извержения по руслу р. Сухая Хапица.

Побочное извержение им. XXV-летия ИВ происходило, как уже отмечалось выше, на фоне эксплозивно-эффузивного извержения вершинного кратера. В момент начала побочного прорыва в вершинном кратере наблюдались газопепловые взрывы и выбросы бомб; излияния лавы на склоны вулкана не было, оно возобновилось лишь спустя несколько дней, 3 февраля. В августе — середине сентября, к концу побочного извержения, в эффузивной деятельности вершинного кратера стали возникать длительные перерывы (до 20 дней, см. рис. 1). Сразу после окончания побочного извержения 14 сентября излияние лавы из вершинного кратера возобновилось с новой силой: лава стала стекать по трем желобам сразу (см. Приложение, рис. 1, к).

Несмотря на продолжительные побочное и вершинное извержения, существенного сброса давления в питающей системе вулкана, по-видимому, не произошло, и с конца ноября 1988 г. на склонах вулкана возобновился процесс трещинообразования.

20 ноября на северо-восточном склоне в интервале высот 2200—3000 м наблюдалось образование системы радиальных трещин, сопровождавшееся движением небольшого грязевого потока. Поперечные размеры зоны трещинообразования не превышали 200 м, наибольшая ширина трещин была около 5—6 м, видимая глубина около 4 м. Ювенильный материал по трещинам не поступал (см. Приложение). Парение прекратилось через неделю.

Образование трещин и локализованных на них эруптивных центров было интенсивным в декабре 1988 г. 14 декабря 1988 г. началось излияние лавы на высоте 2800 м на северо-восточном склоне. Длина лавового потока составила 600 м, ширина 5—6 м. Движение лавы по поверхности ледника вызвало быстрое таяние снега и льда и образование грязевого потока длиной 10—12 км. Высота фонтанирования лавы в истоке не превышала 15—20 м, скорость течения лавы была около 0,6 м/с. Извержение на высоте 2800 м закончилось 19 декабря, но двумя днями раньше, 17 декабря, на том же северо-восточном склоне на высоте 4400 м на продолжении трещины 14 декабря образовался второй эруптивный центр, из которого в течение короткого времени выжималась лава и вытек грязевой поток. 18 декабря движение лавы уже не обнаруживалось (данные облета), а 19 декабря из газовой бокки прорыва на высоте 4400 м в течение 2 ч выбрасывались фонтаны лавы на высоту 300—400 м.

22 декабря на восточном склоне на высоте 3500 м образовалась еще одна субрадиальная трещина, из которой началось интенсивное излияние лавы. Извержение было эффузивным. Фронт лавового потока распространился к концу извержения 15 января 1989 г. до отметки 3200 м. Грязевые потоки спустились до зоны кустарника (700 м).

1989 г. Высокий уровень эффузивной активности вершинного кратера сохранялся до конца июля 1989 г. По сравнению с 1988 г. в 1989 г. произошло изменение направления движения основной массы изливавшейся из кратера лавы с западного и юго-западного на северо-западное. Периоды усиления стромболианской деятельности вершинного кратера наблюдались в марте-апреле и июле-августе, когда высота лавовых фонтанов достигала 500—600 м, а частота выбросов  $10\text{--}12\text{ мин}^{-1}$  (см. рис. 2, Приложение).

В 1989 г. продолжалось интенсивное трещинообразование на склонах вулкана. 13—15 января наблюдалось выжимание лавового потока на восточном склоне на высоте 3800 м.

6 февраля на юго-юго-восточном склоне, выше прорыва XXV-летия ИВ, на высоте 4400 м образовался эруптивный центр, над которым 16 февраля

наблюдался шлаковый конус высотой до 5 м, от конуса вверх по склону на 100 м трассировалась радиальная трещина. Длина лавового потока 1 км, ширина у истока 1—2 м. Грязевых потоков не было. Извержение продолжалось до 22 февраля. 23 февраля из бокки в северо-западном основании внутрикратерного шлакового конуса (высота 4650 м) началось взрывно-эффузивное извержение. Высота фонтанирования лавы достигала 500—600 м. Фронт лавового потока остановился на отметке 3500 м. Извержение закончилось 15 марта.

26 июля 1989 г. на юго-восточном склоне вулкана в системе радиальных трещин на высоте 4300—4400 м началось продолжительное побочное извержение, прорыв им. Скуридина. По характеру деятельности прорывов был аналогичен извержению им. XXV-летия ИВ, но начальная стадия развития прорыва была несколько иной. Магистральная радиальная трещина рассекала юго-восточный склон вулкана от кромки старого кратера вдоль Апахончичского желоба до отметки 4000 м. Ширина трещины на высоте 4300—4400 м, откуда началось излияние лавы, достигала в коренных породах 7—10 м. Общая ширина трещиноватой зоны, включавшей многочисленные оперяющие разрывы, составляла 200—250 м. В течение месяца после начала извержения каждые несколько дней происходило перемещение эффузивных центров вниз с образованием вдоль трещины цепочки небольших конусов. Последний центр локализовался на высоте 4000 м и не менялся до конца извержения. Ширина лавового потока на истоке в начале извержения изменялась от 1 до 3 м, мощность — от 1,5 до 2 м, скорость истечения лавы от 1 до 3 м/с, расход лавы был близок к 2—5 м<sup>3</sup>/с. Извержение продолжалось 200 дней, в ходе его величина расхода неоднократно менялась, что отражалось в образовании новых лавовых русел. Фронтальные части лавовых потоков опустились до отметки 2500—2800 м. В октябре фонтанирование лавы достигло 50—70 м при частоте 15 мин<sup>-1</sup>.

Начальная стадия побочного извержения им. Скуридина развивалась на фоне июльско-августовского усиления стромболианско-вулканской деятельности вершинного кратера.

С сентября по декабрь 1989 г. взрывная активность вершинного кратера Ключевского вулкана снизилась и проявлялась главным образом в газопепловых выбросах, высота которых не превышала 600—800 м. Поступление лавы из вершинного кратера на склоны вулкана не наблюдалось. На побочном прорыве в это время продолжалась эффузивная деятельность, происходило формирование лавового поля.

В конце января — февраля 1990 г. наблюдалась мощная активизация вершинного кратера, во время которой усилилась взрывно-эффузивная деятельность побочного прорыва им. Скуридина. 7—8 февраля вдоль субрадиальной трещины между вершинным кратером и эффузивным жерлом прорыва на высоте 4000 м были отмечены парогазовые выходы, образующие клубы высотой до 30—40 м. Одновременно магистральная трещина, дугообразно обогнув центр побочного прорыва, распространилась вниз по склону до высоты 2500—2700 м. Этот процесс также сопровождался интенсивным паро- и газоотделением. Усилившаяся в январе-феврале 1990 г. взрывно-эффузивная деятельность эруптивного центра на высоте 4000 м привела к формированию здесь шлакового конуса высотой около 30 м и лавового пьедестала с максимальной мощностью 40—50 м. Высота бортов лавовых потоков вблизи истока достигала 10—15 м. Побочное извержение им. Скуридина закончилось 10 февраля 1990 г. По предварительным данным объем извергнутых продуктов оценивается ~0,03 км<sup>3</sup>. В целом расход извергнутых продуктов Ключевского вулкана за последнее пятилетие не превышал величины многолетнего среднего расхода (~1 м<sup>3</sup>/с, по данным И.В. Мелекесцева) и был близок к 0,9 м<sup>3</sup>/с.

**Сейсмичность.** Для оценок сейсмичности в 1988—1989 гг. использовались данные Ключевской телеметрической сети сейсмостанций (с/ст.) [1] с привлечением данных станций региональной сети (с/ст. VDP, KZR). На рис. 1 и 2



показаны суточные изменения основных характеристик сейсмической и вулканической активности Ключевского вулкана за 1988—1989 гг. На рис. 3 приведены послойные карты эпицентров коровых землетрясений района Северной группы вулканов за эти же годы. Как и прежде [2], в рассматриваемые годы сейсмическая активность Ключевского вулкана сосредоточивалась в области вокруг вершинного кратера (Центральная зона) и была представлена вулканическими землетрясениями I—IV типов по классификации П.И. Токарева [4] и вулканическим дрожанием. В пределах Центральной сейсмоактивной зоны были определены координаты очагов подавляющего большинства землетрясений со средним энергетическим классом  $K_s \geq 6,0$ , а также многих более слабых событий. На глубинах  $< 5$  км (см. рис. 3,а) размеры Центральной сейсмоактивной области в 1988—1989 гг. были наибольшими, область почти изометрична, с радиусом  $\sim 7$  км и центром, несколько смещенным относительно вершинного кратера к востоку. Здесь в верхних горизонтах земной коры и в вулканической постройке возникали группы и рои землетрясений II—III типов, связанные с вершинными и побочными извержениями Ключевского вулкана ( $K_s^{\max} = 8,9$ ). В интервале глубин 5—9 км (см. рис. 3,б) в 1988—1989 гг. было отмечено всего несколько землетрясений ( $K_s^{\max} = 7,3$ ). Более активны были нижние горизонты земной коры на глубинах 20—30 км, где слабые, но многочисленные землетрясения образовали область, вытянутую в направлении с северо-запада на юго-восток примерно на 9 км, ширина зоны  $\sim 6$  км,  $K_s^{\max} = 6,5$ .

Распределение числа  $N$  и энергии  $K_s^{\max}$  землетрясений I ( $H \geq 5$  км) и II—III ( $H < 5$  км) типов во времени в течение 1988—1989 гг. показано на рис. 1 (г—ж) и 2 (г—ж) соответственно. Учитывались все землетрясения с  $K_s \geq 5,5$ , зарегистрированные сейсмостанциями *APH*, *ZLN*, *PDK*, *KRS*, либо всеми, либо одной из них. Поэтому количество событий на графиках значительно больше того, что мы видим на картах эпицентров. Наиболее примечательным в сейсмической деятельности Ключевского вулкана 1988—1989 гг. было возникновение роев землетрясений, число которых за эти 2 года составило 11.

Продолжительность роев колебалась от 2 до 28 сут, число землетрясений в роях изменялось от 30 до 480 (включая события, зарегистрированные одной-двумя станциями), энергетический класс наиболее сильного события в роях варьировал в пределах нескольких порядков, от 6,0 до 8,9. Все рои происходили вокруг центрального кратера на глубине менее 5 км, и только в рое 2—30.VIII 1989 г. наряду с поверхностными землетрясениями отмечались отдельные землетрясения с глубиной очага 15—30 км (см. рис. 2, г—ж).

Рои землетрясений 19.I—3.II 1988 г. и 22—30.VII 1989 г. предварили два наиболее крупных за рассматриваемый отрезок времени побочных извержения: им. XXV-летия Института вулканологии в 1988 г. и им. Скуридина в 1989 г. Карты эпицентров этих роев землетрясений показаны на рис. 4, а—г соответственно. Образование побочных прорывов в обоих случаях происходило на конечной стадии развития роев, на спаде числа землетрясений. Что касается наиболее сильных событий, то и в 1988 и в 1989 гг. землетрясения максимального в рое энергетического класса возникали после начала прорыва (см. рис. 4, б, г). Во время побочного прорыва им. Скуридина, происходившего на фоне непрекращавшегося вершинного извержения, были зарегистрированы рои 2—30.VIII и 23—28.XI 1989 г., состоявшие из слабых и очень неглубоких землетрясений, координаты многих из них определить было невозможно.

Рои землетрясений 25.X—10.XI, 13.XI—3.XII, 25—30.XII 1988 и 1—16.I 1989 г. происходили при пониженной эффузивно-эксплозивной активности вершинного кратера и, по всей вероятности, сопровождали образование системы трещин и последующие кратковременные излияния лавы на северо-восточном

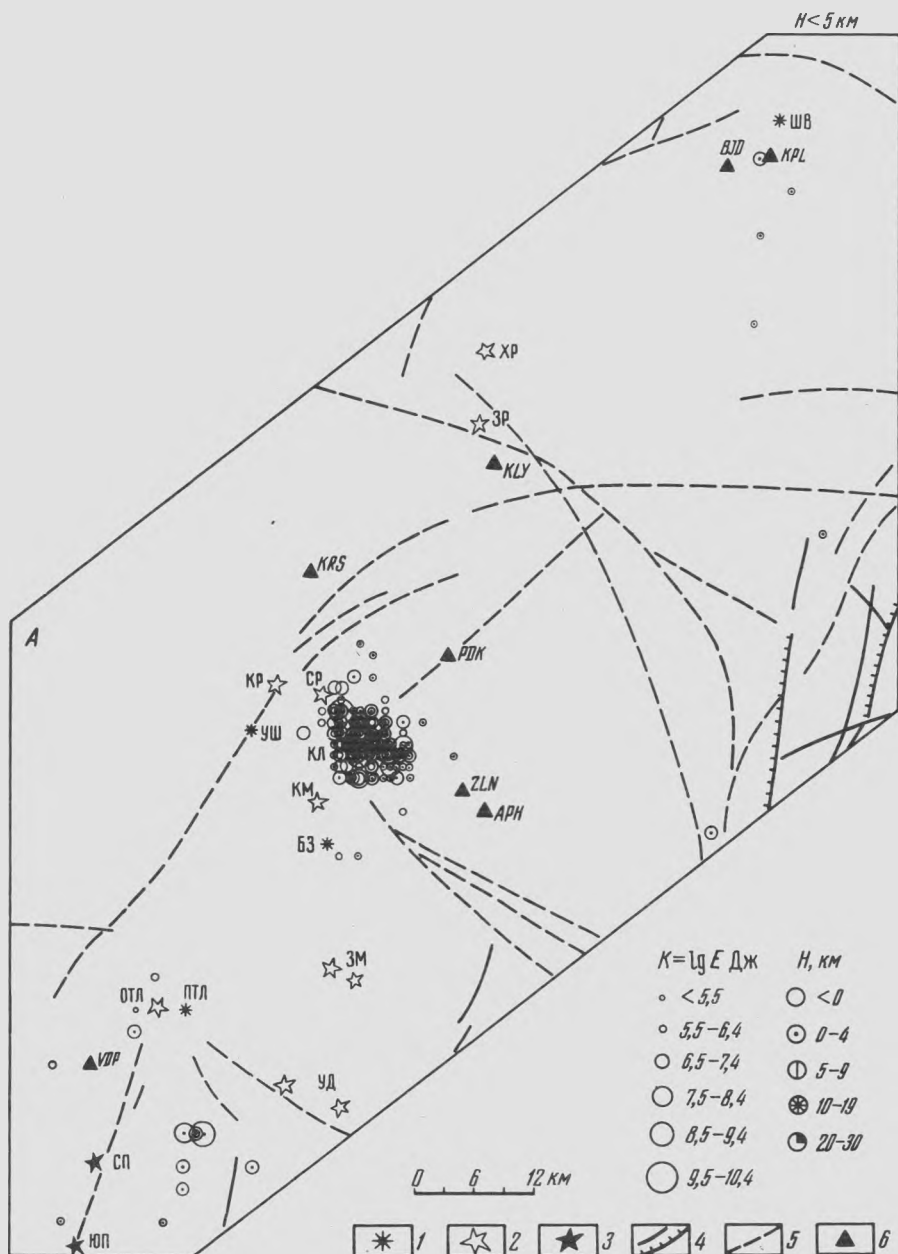


Рис. 3, а

склоне вулкана. Наблюдается хорошее пространственное совпадение эпицентральных зон этих роев и области трещинообразования. Временная связь между возникновением землетрясений и трещин и прорывов на поверхности в этих случаях с точностью до суток не прослеживалась.

Рои землетрясений 27.XII 1987 г. — 6.I 1988; 6—8.IV 1988; 7—13.X 1988 гг. сопровождали усиление эксплозивной деятельности вершинного кратера. Подробное описание и анализ перечисленных роев землетрясений, связанных с активностью Ключевского вулкана в 1988—1989 гг., будут даны в отдельной статье.

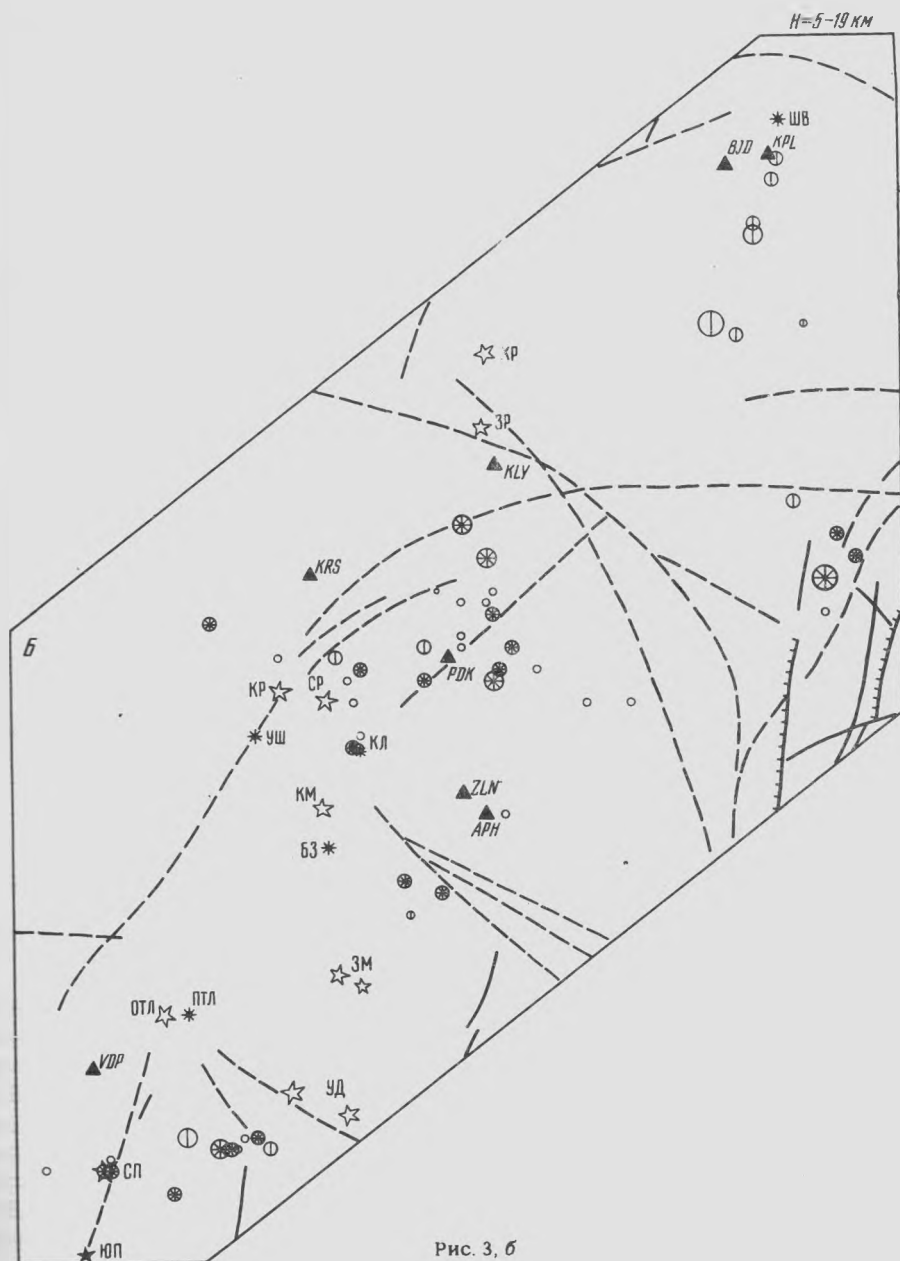


Рис. 3, б

Вулканическое дрожание и землетрясения IV типа, сопровождавшие вершинные и побочные извержения Ключевского вулкана, регистрировались в 1988—1989 гг. почти непрерывно (см. рис. 1, а—в; 2, а—в) и были связаны с процессами, происходившими в питающем канале и кратере вулкана. Изменения в эруптивной деятельности отражались на характере изменения амплитуды вулканического дрожания (в.д.). Преобладающие периоды колебаний лежали в пределах 0,5—1,0 с.

Во время роя землетрясений, предвалявшего побочный прорыв им. XXV-летия ИВ, перед началом извержения, с 19 до 27.I 1988 г., амплитуда в.д. понизилась до 0,1—0,2 мкм (см. рис. 1, в). С началом побочного извержения с 28.I по 3.II в.д.

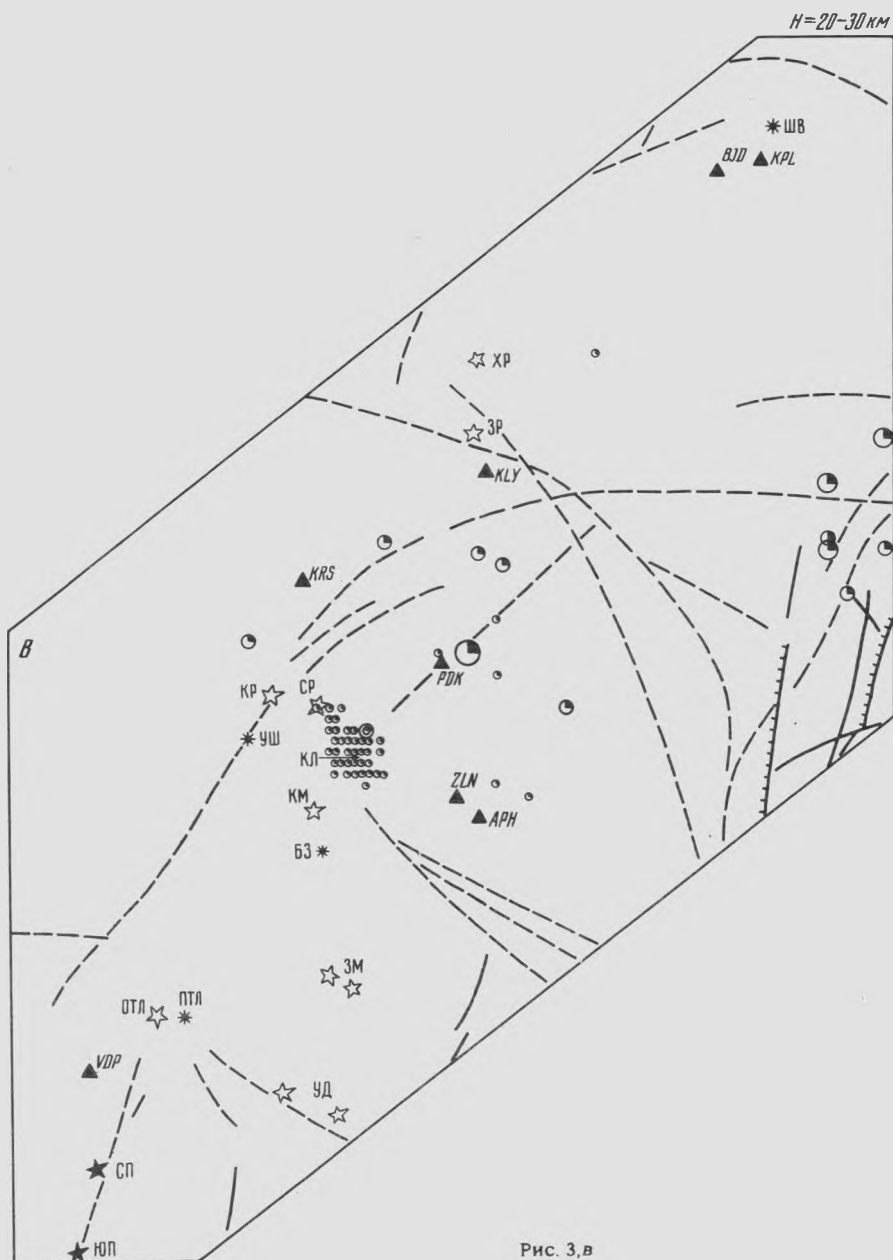


Рис. 3, в

Рис. 3. Послойные карты эпицентров коровых землетрясений в районе Северной группы вулканов за 1988—1989 гг., км: А — для глубин < 5; Б — для глубин 5—19; В — для глубин 20—30. 1 — действующие вулканы: ШВ — Шивелуч; КЛ — Ключевской; БЗ — Безымянный; УШ — Ушковский; ПТЛ — Плоский Толбачик; 2 — потухшие вулканы: ХР — Харчинский; ЗР — Заречный; СР — Средний; КР — Крестовский; КМ — Камень; ОТЛ — Острый Толбачик; ЗМ — Зимины сопки; УД — Удины сопки; 3 — Северный (СП) и Южный (ЮП) прорывы Большого трещинного Толбачинского извержения, побочные прорывы 1988—1989 гг. На склонах Ключевского вулкана (ПР 1988, ПР 1989); 4, 5 — тектонические нарушения: 4 — установленные, 5 — предполагаемые; 6 — сейсмические станции

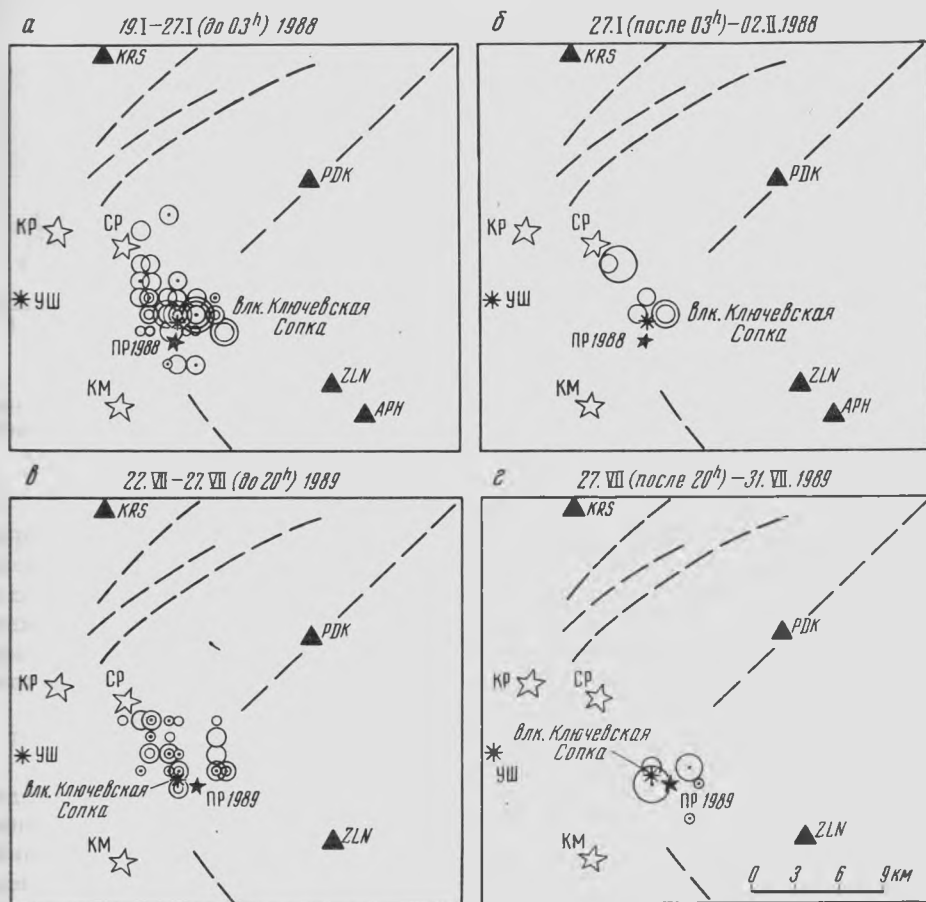


Рис. 4. Карты эпицентров роев землетрясений Ключевского вулкана 19—31.I 1988 г. (а, б) и 22.VII—31.VII 1989 г. (в, г. Условные обозначения см. на рис. 3

усилилось (рой землетрясений продолжался до 3.II), при этом наблюдались резкие перепады в величине амплитуды в.д., которая изменялась от 0,2 до 2 мкм. Продолжительность "всплесков" интенсивности в.д. составляла от 20 мин до 2—3 ч. В дальнейшем заметные колебания величины амплитуды в.д. наблюдались несколько раз в апреле-мае, во время усиления эксплозивной активности вершинного кратера, во второй половине октября — начале ноября, во время прекращения эффузивной деятельности вершинного кратера, в середине декабря, накануне и во время образования системы трещин и кратковременных побочных прорывов на северо-восточном склоне Ключевского вулкана.

В 1989 г. общий уровень в.д. как по средним амплитудам, так и по максимальным был выше, чем в 1988 г., величина максимальной амплитуды в.д. достигала 4 мкм в первом и 6 мкм во втором полугодии (см. рис. 2, в). Увеличение уровня в.д. с одновременной резкой сменой периодов увеличения и уменьшения амплитуды колебаний отмечалось в первой половине января на заключительной стадии побочного извержения 22.XII 1988 г. — 15.I 1989 г., со второй половины февраля до конца апреля и с середины августа до конца ноября 1989 г., накануне и во время раскрытия трещин на склоне вулкана и при усилении эксплозивной деятельности вершинного кратера (см. рис. 2, в).

Как и перед прорывом им. XXV-летия ИВ, резкий спад интенсивности в.д. наблюдался на третий день после начала роя землетрясений 22—30.VII 1989 г.,

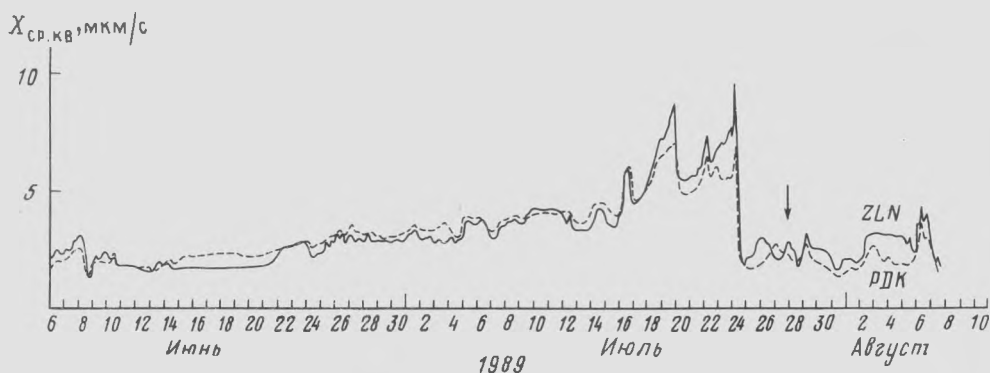


Рис. 5. Изменения уровня вулканического дрожания Ключевского вулкана в июне–августе 1989 г. (данные сейсмостанций ZLN и PDK).  $X_{\text{ср.кв}}$  — среднее квадратическое значение скорости смещения грунта, интервал интегрирования — 6080 с. Стрелкой отмечено начало побочного извержения

предварявших побочный прорыв им. Скуридина (см. рис. 2, в). Это хорошо иллюстрирует рис. 5, на котором показано изменение во времени среднее-квадратического значения скорости смещения грунта  $\bar{X}(t)_{\text{ср.кв}}$ , вызванного в.д. Для получения значений  $\bar{X}(t)_{\text{ср.кв}}$  использовался комплекс аппаратуры, состоящий из магнитного регистратора с частотно-модулированной (ЧМ) записью, магнитографа воспроизведения, вольтметра, измеряющего среднее-квадратические значения напряжения, и самописца.  $\bar{X}(t)_{\text{ср.кв}} = \sqrt{1/\tau \int_0^\tau \dot{X}(t)^2 dt}$ , где  $\tau$  —

интервал интегрирования. При обработке данных значение  $\tau$  выбирают, исходя из длительности интервала, на протяжении которого допустимо предположение о стационарности процесса, и приемлемой величины погрешности измерений. В нашем случае обработка записей вулканического дрожания велась при значении  $\tau = 6080$  с (см. рис. 5), а обработка сейсмометрических данных, связанных с активизацией вулканов Безымянный и Шивелуч, проводилась при  $\tau = 12$  с (см. ниже).

Указанная методика обработки сейсмометрических данных предложена и реализована В. А. Гавриловым и А. Л. Пудовым, использована в практике обработки в.д. В. П. Ханзутиным.

На графике рис. 5 показано, что перед побочным прорывом в.д. в течение 1,5 мес. постепенно нарастало, а за 15 дней до прорыва приняло неустойчивый характер с общей тенденцией к увеличению. 24 июля, во время роя землетрясений, предшествовавших побочному извержению, произошел резкий спад в.д. Время начала побочного извержения 28 июля заметным изменением в.д. не отметилось. Это, видимо, связано с тем, что основная роль в в.д. принадлежала процессам, происходящим в центральном кратере, а вклад от побочного извержения в данном случае был незначителен.

Таким образом, сейсмические явления, наблюдавшиеся в 1988–1989 гг. на Ключевском вулкане, были разнообразны, как и его вулканическая деятельность. Для побочных прорывов, начавшихся 27.I 1988 г. и 28.VII 1989 г., характерно возникновение предваряющих роев землетрясений и резкое понижение уровня в.д. за несколько дней до начала извержений в процессе развития роев. Для кратковременных побочных извержений (на северо-восточном склоне вулкана) в декабре 1988 — феврале 1989 гг. такая закономерность не прослеживается. Возможно, это связано с поступлением больших порций магмы к генеральным трещинам, раскрывшимся в январе 1988 г. и июле 1989 г.

**Геодезические наблюдения.** Геодезические измерения в 1988–1989 гг. на

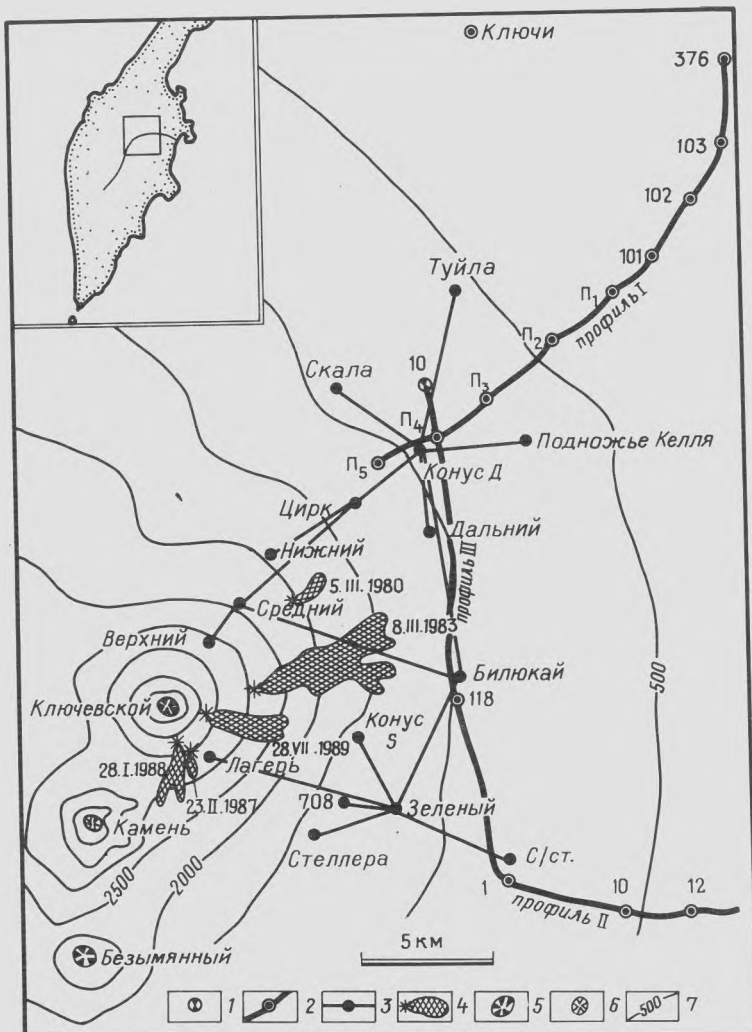


Рис. 6. Схема района исследований, расположения побочных извержений 1980—1989 гг., нивелирных профилей и линий тригонометрического нивелирования. 1 — скальные реперы; 2 — грунтовые реперы; 3 — линии тригонометрического нивелирования; 4 — шлаковые конусы и лавовые потоки побочных извержений; 5 — кратеры действующих вулканов; 6 — кратеры потухших вулканов; 7 — горизонталы

Ключевском вулкане выполнялись для определения пространственных и временных смещений земной поверхности. Схема геодезических построений представлена на рис. 6. Для определения вертикальной составляющей деформаций проводились повторные нивелировки на радиальных профилях I, II и на секущем профиле III.

Учитывая результаты работ, полученные ранее [5], а также то, что начиная с 1983 г. побочные прорывы происходили на высотах от 3,0 до 4,0 тыс. м., радиальные профили I и II были продолжены до отметок 3 и 2,8 тыс. м соответственно. Выполнение на таких высотах геометрического нивелирования затруднительно и нецелесообразно, поэтому определение вертикальной составляющей деформаций земной поверхности проводилось двусторонним тригонометрическим нивелированием [3]. Одновременно измерялись длины линий.

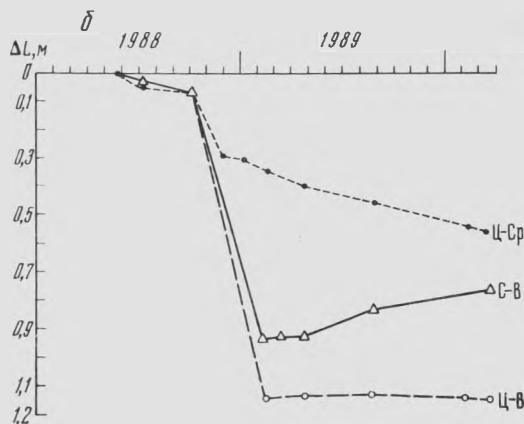
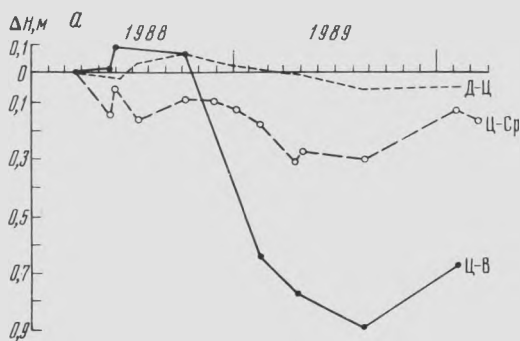


Рис. 7. Вертикальные смещения по результатам геометрического (а) и тригонометрического (б) нивелирования по профилю I за 1987—1990 гг.

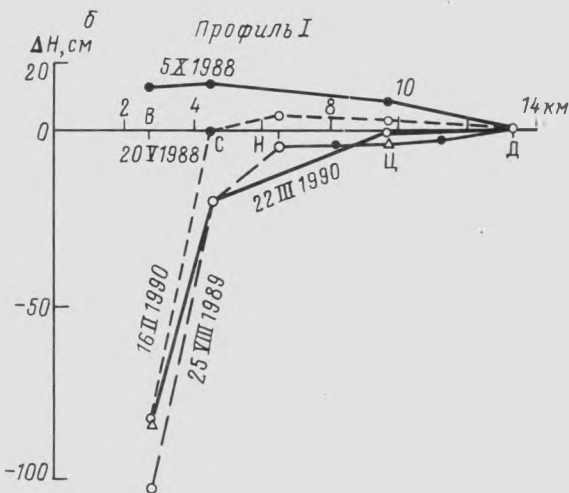
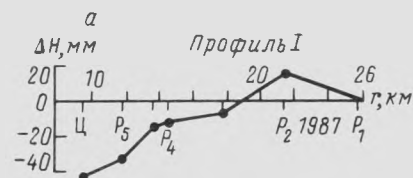


Рис. 8. Вертикальные (а) и горизонтальные (б) смещения для пунктов профиля I, отстоящих на различные расстояния от кратера вулкана Ключевской за 1988—1990 гг.

Наиболее представительные результаты получены для рядов наблюдений, выполненных по радиальному профилю I (рис. 7, а) и его продолжению (рис. 7, б). За 1987—1989 гг. зарегистрирована общая тенденция опускания склона на участках, удаленных от кратера на расстояние от 10 до 26 км. По результатам геометрического нивелирования амплитуда смещения за 2 года близка к 76 мм на участке профиля длиной 16 км (рис. 7, а). Раскрытие трещин с образованием грязевых потоков на северо-восточном склоне 20 ноября 1988 г. вблизи пункта Средний сопровождалось опусканием пункта Верхний относительно пункта Цирк на 0,7 м. Опускание продолжалось до середины августа 1989 г. (рис. 7, б). Характерно уменьшение вертикальных смещений по мере удаления от кратера (рис. 8, а). Вертикальные смещения минимальны между пунктами, наиболее удаленными от кратера (конус Д — Цирк), увеличиваются до 30 см между пунктами Цирк — Средний и достигают максимума для превышения между пунктами Цирк — Верхний. За короткие промежутки времени на тригономет-



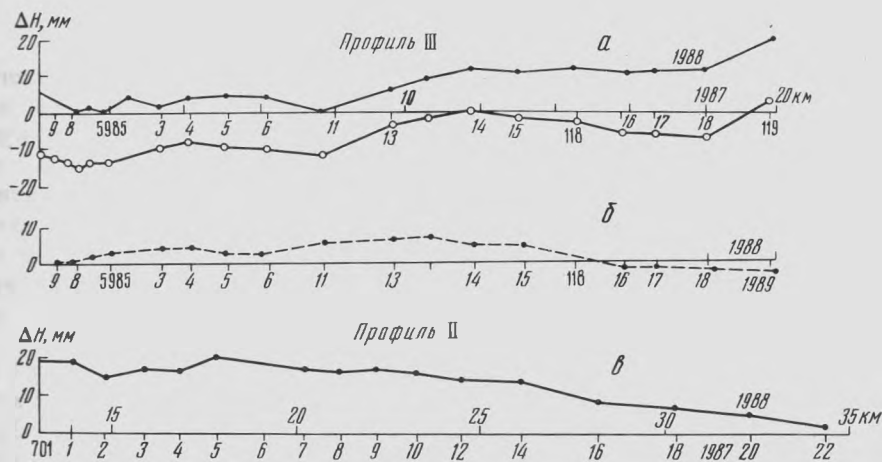


Рис. 9. Вертикальные смещения по результатам геометрического нивелирования по секущему профилю III: за 1987—1988 гг. (а), 1988—1989 гг. (б), по радиальному профилю II за 1987—1988 гг. (в)

рическом профиле (конус Д — пункты Цирк — Средний — Верхний) наблюдаются знакопеременные вертикальные смещения.

Из результатов наблюдений видно, что значимые деформации происходили преимущественно на высотах от 2 до 4 тыс. м. Считая деформации однородными, выполнена оценка изменения объема в секторе между профилем I (азимут  $\sim 45^\circ$ ) и направлением трещин с азимутом  $\sim 90^\circ$ . За центр сектора принято месторасположение прорыва 1988 г., нижняя граница сектора проходила по горизонтали 2,0 тыс. м. Изменение объема близко к  $\approx 0,0044 \text{ км}^3$ .

Наблюдавшийся в конце 1988 г. подъем сменился опусканием вершины после раскрытия трещин в ноябре и серии коротких извержений в декабре, первом квартале 1989 г. (рис. 8,а). Измерения длин линий на тригонометрическом профиле I показали также значительные горизонтальные смещения (сжатие до 1,0 м). Раскрытие трещин сопровождалось сжатием вдоль направления распространения трещин. Дальнейшие наблюдения показали, что пункт Средний имеет тенденцию к сползанию вдоль склона со скоростью 18 мм/мес. О сползании свидетельствует различие знаков горизонтальных смещений по линиям пунктов: Средний — Верхний — расширение, а по линии Средний — Цирк — сжатие (рис. 8,б).

Результаты геометрического нивелирования по радиальному профилю II (рис. 9,в) за 1987—1988 гг. свидетельствуют о незначительном опускании склона вулкана (опускание удаленной от вулкана части профиля или подъем в направлении вершины). Амплитуда смещения близка к  $\sim 20$  мм при длине профиля  $\sim 25$  км. По секущему профилю III также наблюдается подъем в направлении профиля II. Секущий профиль III имеет близгоризонтальное расположение, и при осесимметричном источнике давления под вулканом и однородной, не нарушенной разломами среде смещения на этом профиле не должны происходить. Наиболее контрастные смещения зарегистрированы на двух секциях от 11-го до 13-го репера и между 18-м и 20-м реперами. Амплитуда смещения близка к 20 мм на базе 20 км (рис. 8, а,б). Наблюдаемые контрастные смещения, возможно, связаны с радиальными трещинами, трассирующими постройку вулкана. Следует заметить, что побочные прорывы 1980, 1983, 1987—1989 гг. приурочены к трещинам северо-восточного простирания.

Из анализа геодезических данных можно сделать вывод о том, что эруптивная деятельность Ключевского вулкана сопровождалась деформациями земной поверхности, приуроченными главным образом к побочным прорывам.

## Состояние Ключевского вулкана в 1988–1989 гг.

Время наблюдений, год, месяц, число	Вулканическая деятельность	Расположение взрывных жерл в вершинном кратере, трещин и побочных взрывных центров	Направление движения лавовых потоков	Дополнительные сведения об извержениях
1988, январь–февраль	Вершинный кратер, взрывная деятельность, фонтанирование лавы	Два взрывных жерла в центральной и западной частях внутрикратерного шлакового конуса	—	Высота фонтанов до 200 м; частота выбросов 12–16 мин <sup>-1</sup> ; высота газопепловой колонны 1,5–2 км над кратером, шлейф до 30–40 км.
Январь, 13–18, 21–23	Вершинный кратер, эффузивная деятельность	—	Юго-западный склон	—
Январь, 27 — сентябрь, 14	Побочное извержение им. XXV-летия ИВ, преимущественно эффузивное	Юго-юго-восточный склон, высота эффузивного жерла прорыва 4000 м, вверх от жерла к вершине вулкана образовалась система трещин	Лава из побочного прорыва двигалась по юго-восточному склону	Длительность извержения 230 сут, объем извергнутых базальтов 0,0336 км <sup>3</sup> , расход лавы 1–4 м <sup>3</sup> /с. Лавовые потоки спустились до отметки 3200 м. Взрывная деятельность проявилась в фонтанировании лавы на высоту до 30–40 м и выбросах пара
Февраль, 3–4; 11–12; 22–24	Вершинный кратер, эффузивная деятельность	—	Северо-западный (Крестовский) желоб	—
Февраль, 3–20; 25–27	—	—	Юго-западный склон	—
Февраль, 26	Обнаружение газовой бокки на склоне вулкана между вершинным кратером и эффузивным жерлом побочного прорыва им. XXV-летия ИВ	Юго-восточный склон высота 4350 м	—	Парогазовые взрывы из газовой бокки на высоту до 300 м
Март, 3–10; март, 19 — апрель, 2	Вершинный кратер, эффузивная деятельность	—	Юго-западный склон	—
Март, 27 — апрель, 5	То же	—	Северо-западный (Крестовский) желоб	—
Апрель–май	Вершинный кратер, взрывная деятельность, фонтанирование лавы	Два взрывных жерла в кратере	—	Высота лавовых фонтанов до 400 м; частота выбросов до

Апрель, 2—24	То же	—	Западный склон	101 мин <sup>-1</sup> Высота газопепловой колонны до 2 км над кратером, длина шлейфа до 30 км. Умеренная фреатическая деятельность (менее 1 км)
Апрель, 21—23; май, 1—3	»	—	Северо-западный (Крестовский) желоб	—
Май, 19 — июнь, 3	»	—	Западный склон	—
Июнь, 18 — июль, 3	»	—	Северо-западный (Крестовский) желоб	—
Июнь, 22—24, июль, 4—8	Вершинный кратер, эффузивная деятельность	—	Западный склон	—
Июль, 22 — август, 5	То же	—	Северо-западный (Крестовский) желоб	—
Август, 25—27	»	—	Западный склон	—
Август, 30	Вершинный кратер	—	—	Выбросы газовых колец
Август, 30	Вершинный кратер, взрывная деятельность, фонтанирование лавы	В Вершинном кратере работают от 1 до 3 взрывных жерл	—	Высота лавовых фонтанов до 200—300 м, частота выбросов 10—121 мин <sup>-1</sup> высота газопепловой колонны до 1,5—2 км над кратером, шлейф до 20 км
Сентябрь, 10; 17—20	Вершинный кратер, эффузивная деятельность	—	—	—
Сентябрь, 17—18	То же	—	Северный склон	—
Сентябрь, 21—27	»	—	Северо-западный (Крестовский) желоб	—
Сентябрь, 26 — октябрь, 21	»	—	Северный склон	—
Сентябрь, 27—28	Вершинный кратер, взрывная деятельность	—	—	Выбросы газовых колец
Сентябрь, 30 — октябрь, 13	Вершинный кратер, эффузивная деятельность	—	Западный склон	—
Октябрь, 1—2; 18—20	То же	—	Северо-западный (Крестовский) желоб	—
Октябрь, 21—29	»	—	Западный склон	—
Ноябрь, 20	Образование системы радиальных трещин на склоне вулкана	Северо-восточный склон, высота 2200—2400 м	—	Протяженность зоны трещинообразования порядка 800 м вверх по склону в направлении к вершинному кратеру, ширина зоны 100—200 м, ширина

Время наблюдений, год, месяц, число	Вулканическая деятельность	Расположение взрывных жерл в вершинном кратере, трещин и побочных eruptивных центров	Направление движения лавовых потоков	Дополнительные сведения об извержениях
Декабрь, 13—14	Вершинный кратер, слабая эффузивная деятельность	—	Северо-западный (Крестовский) желоб	—
Декабрь, 14—19	Взрывно-эффузивное извержение на склоне вулкана	Северо-восточный склон, высота 2800 м	Северо-восточный склон	Магистральной трещины около 6 м, температура воздуха в трещинах +25—+30° С (измерения Е. Ю. Ждановой). Образование системы трещин сопровождалось движением грязевого потока длиной до 1 км. Пепел с бортов магистральной трещины резургентный (анализировал А. А. Овсянников)
Декабрь, 17—19	Взрывно-эффузивное извержение на склоне вулкана	Образование на северо-восточном склоне в створе с трещиной 14 декабря на высоте 4400 м нового eruptивного центра	—	Излияние лавы до 18 декабря, длина лавового потока 0,6 км, ширина 5—6 м, скорость течения лавы 0,6 м/с. Фонтанирование лавы до 19 декабря, высота фонтанов в истоке до 15—20 м
Декабрь, 19 — начало января 1989 г.	Слабая взрывная деятельность на склоне вулкана	Северо-восточный склон, высота 4400 м	—	17 декабря кратковременное излияние небольшой порции лавы, образование грязевого потока длиной 1,5—2 км. 19 декабря в течение 2 ч (с 8 до 10 час. по Гринвичу) фонтанирование лавы на высоту до 400—500 м, частота выбросов 2—3 мин <sup>-1</sup>
Декабрь, 22—1989, январь, 15	Существенно эффузивное извержение на склоне вулкана	Восточный склон, высота 3600 м	Восточный склон	Парогазовые выделения
				Излияние лавового потока до 13—14 января 1989 г., фонтанирование лавы до 15 января 1989 г., высота лавовых фонтанов до 10—15 м

1989 г., март, 12 — сентябрь, 14	Вершинный кратер, эксплозивная деятельность стромболианского и стромболианско-вулканского типа			Почти непрерывные выбросы бомб, фонтанирование лавы в среднем на высоту 100—200 м и газопепловые эксплозии на высоту 1 км. На этом фоне наблюдалась стадия усиления стромболианской деятельности (см. ниже) Небольшой лавовый поток
Январь, 13—15	Кратковременная эффузивная деятельность на склоне вулкана	Восточный склон, высота 3800 м	Восточный склон	
Январь, 20—22	Вершинный кратер, эффузивная деятельность	—	Северо-западный (Крестовский) желоб	
Февраль	Вершинный кратер, эксплозивная деятельность	В центральном кратере работало два жерла		Неравномерное фонтани- рование лавы: серии взрывов (12—14 мин <sup>-1</sup> ), разделенных промежутками покоя в 1— 3 мин. Высота газопепловых эксплозий до 600 м, длина шлейфа до 20—30 км
1990 г., июль, 27 — февраль, 10	Побочное извержение им. Скуридина, существенно эффузивное	Юго-восточный склон, высота 4000—4400 м, экспло- зивно-эффузивный центр из- вержения локализовался в системе радиальных трещин. На высоте 4500 м вверх по склону образовалась газовая бокка	Юго-восточный склон	Продолжительность извер- жения 200 дней, объем из- вергнутых базальтов 0,03 км <sup>3</sup> . Извержение началось излия- нием лавы на высоте 4400 м, через месяц центр экспло- зивно-эффузивной деятель- ности локализовался на высоте 4000 м
Август, 24—26	Вершинный кратер, эффузивная деятельность	—	Северо-восточный склон	Продвижение короткого лавового потока сопро- вождалось фреатическими взрывами
Сентябрь — декабрь	Вершинный кратер, снижение эксплозивной активности	—	—	Газопепловые эксплозии на высоту не более 600—800 м
Февраль, 6—22	Эксплозивно-эффузивное из- вержение на склоне вулкана	Юго-восточный склон высота 4500 м, в системе трещин, протянувшихся вверх от побочного извержения 28 января — 14 сентября	Юго-восточный склон	16 февраля над эффузивным жерлом прорыва заметен шлаковый конус высотой 3— 5 м в виде подковы, открытой вниз по склону. Вверх от ко- нуса к вершине вулкана радиальная трещина длиной

Время наблюдений, год, месяц, число	Вулканическая деятельность	Расположение взрывных жерл в вершинном кратере, трещин и побочных eruptивных центров	Направление движения лавовых потоков	Дополнительные сведения об извержениях
Февраль, 23 — март, 15	Субтерминальное, взрывно-эффузивное извержение из бокки в основании внутрикратерного шлакового конуса	Северо-западное основание внутрикратерного шлакового конуса, высота 4650 м	Северо-западный (Крестовский) желоб	около 100 м. Ширина лавового потока в истоке порядка 1—2 м Фонтанирование лавы на высоту до 500—600 м, фронт лавового потока остановился на отметке 3500 м, грязевых потоков не наблюдалось
Март-апрель	Усиление взрывной деятельности вершинного кратера	В кратере работало два жерла	—	Фонтанирование лавы в кратере на высоту до 600—700 м, частота выбросов от 10—12 до 1—5 мин <sup>-1</sup> Высота газопепловой колонны 1,5—2 км, шлейф около 30 км
Март, 20 — июль, 25	Вершинный кратер эффузивная деятельность	—	Северо-западный (Крестовский) желоб	—
Май — июнь	Вершинный кратер, взрывная деятельность	В кратере работало два-три жерла	—	Фонтаны лавы с частотой один выброс в 4—10 мин. Высота газопепловых взрывов до 5 км
Май, 13 — июнь, 26	Вершинный кратер, эффузивная деятельность	—	Западный склон	—
Июль-август	Вершинный кратер, взрывная деятельность	В кратере работало два жерла	—	Выбросы раскаленной пирокластики (от 6—12 до 3—6 мин <sup>-1</sup> ) на высоту до 500—600 м. Высота газопепловых выбросов до 1 км, шлейф до 1—5 км